第2章

人型介護ロボット内部のハードウェアとソフトウェア

分散処理，複数のCPUの連携，モータの干渉駆動など開発テーマが盛りだくさん

平野慎也

人型介護ロボットのハードウェアとソフトウェアで興味深いのは，既に製品化されているものを上手く組み合わせて，新たな付加価値を創造している点である．ここで紹介したハードウェアとソフトウェアが，今後どのように進化していくのか，その過程が注目される．今後，この進化の過程において，新たなるビジネス・モデルが多数，構築されるだろう．（編集部）

第1章でも説明した通りRI-MANは，介護や福祉の現場でさまざまな力仕事を支援する目的で開発されたものです．現在では被介護者とみなした人形（約18kg）を抱き上げることまでできます．

このような仕事を行う際に何よりも重要なのは，人間並みの形状とサイズ，体重という制限の元で大きな力を発生することです．また，人間をロボットの操作対象として扱う際，単に大きな力を発生するだけでは不十分で，ロボットの感覚処理から運動制御に至るまで，各レベルにおいて柔軟な動きを実現する必要があります．

この章では，主にRI-MANの駆動機構と動作制御に関わる制御系のハードウェア構成とソフトウェア処理を中心に解説します．

1．RI-MANの電気制御系の構成

RI-MANの電気制御系の構成を図1に示します．その処理系を大きく分類すると，画像認識や音声情報処理を担当する認知処理用のパソコン（認知系パソコン）と，身体の各自由度の運動制御を統合する運動制御用パソコン（運動系パソコン），そして触覚機能処理と各関節のモータを制御する多数の小型汎用分散型コントローラC-CHIP[注1]があります．このそれぞれが，互いにデータの送受信を行いながら，ロボットを動かしています．

認知系パソコンは，主に画像認識処理による人間の顔抽出と音源定位，音声認識と合成を行い，それぞれの結果を統合して，ロボットにどのような動作を行わせるかを決定します．

運動系パソコンは，認知系パソコンで選択した動作を受けて，実際の各関節角度を計算し，リアルタイムに目標関節情報を下位のC-CHIPに送信します（図2）．

C-CHIPは，運動系パソコンの情報を基に，関節を動かしているモータ・ドライバに指令を出し，関節角度と指令角度を比較しながら制御を行います．

● 認知系パソコンと運動系パソコンの連携

認知系パソコンは，画像認識，音源定位といった高負荷な処理が要求されるので，高速なパソコンを用いています．CPUは3GHzのPentium 4を使っています．OSは，開発のしやすさを考慮してWindows 2000を用いています．開発言語は主にVisual C++6.0で，一部に米国National Instruments社のLabWindows/CVIを用いています．

運動系パソコンは，認知系パソコンほど負荷が高くないので，認知系パソコンよりも小型で，消費電力の少ないも

注1：本誌2006年4月号，pp.104-114の『分散処理を取り入れた自律型ロボット「いもむし」の開発』では，小型汎用分散型コントローラ（C-CHIP）とその応用について解説した．

KeyWord 運動系パソコン，認知系パソコン，C-CHIP，CUnet，共有メモリ，干渉駆動，音声入力ボード，RT-Linux，TD-BD-8CSUSB，LabWindows/CVI

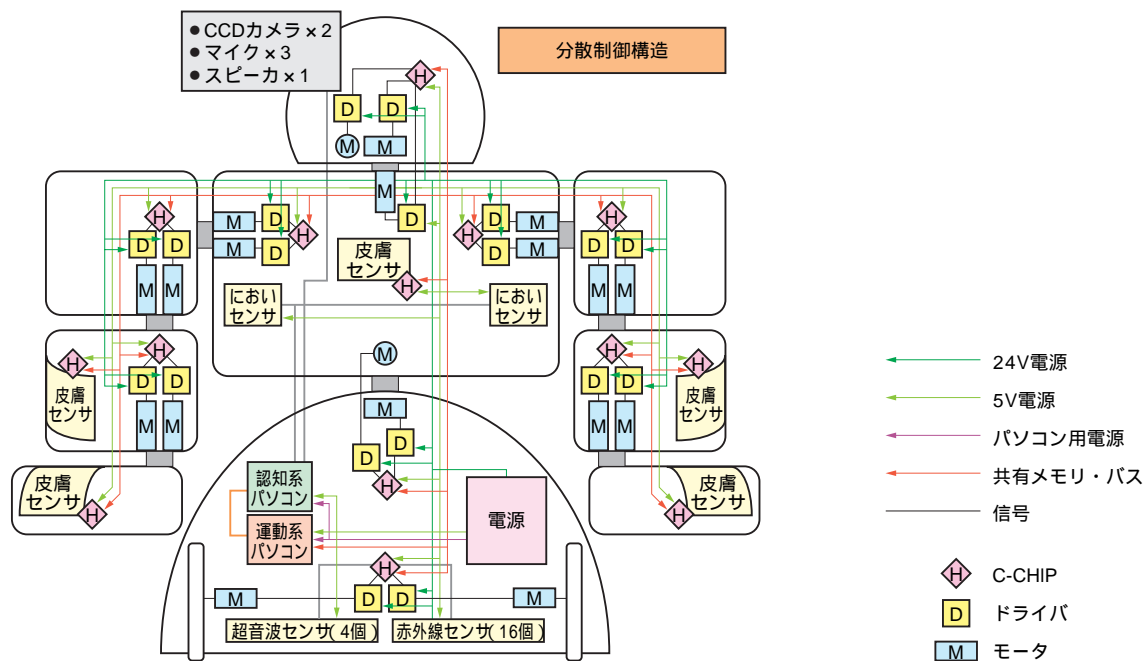



図1　RI-MANを構成するセンサやモータ，パソコンなどの配置
これだけ多くのセンサやモータ，パソコンなどが配置されるのだから開発テーマは尽きない．

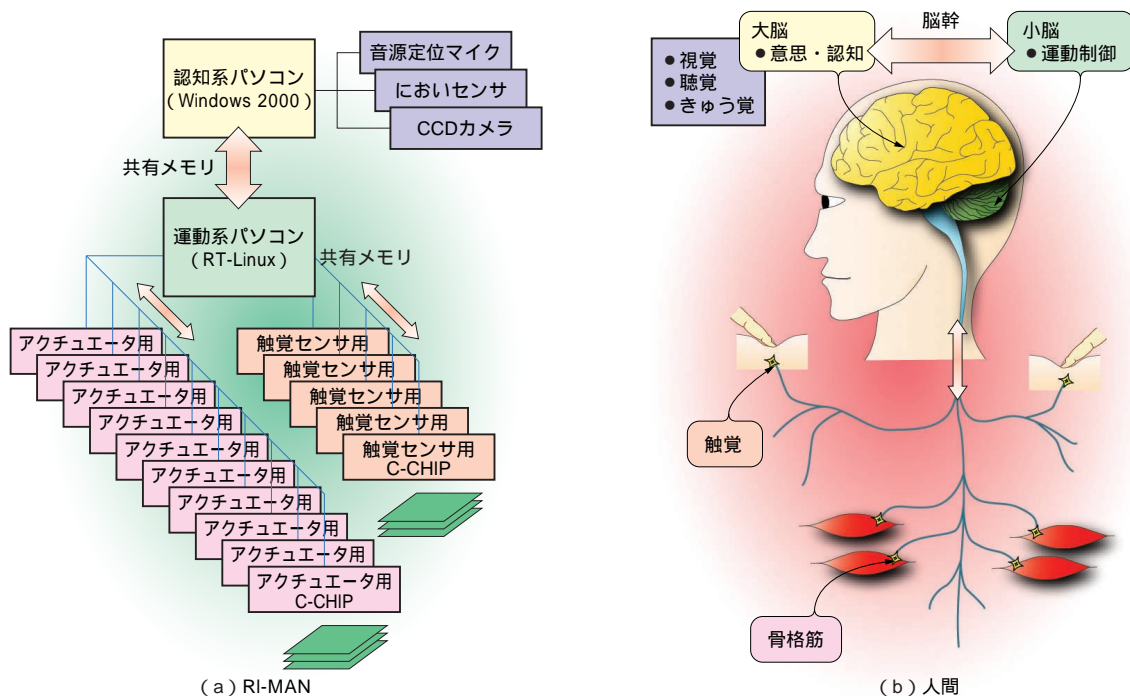
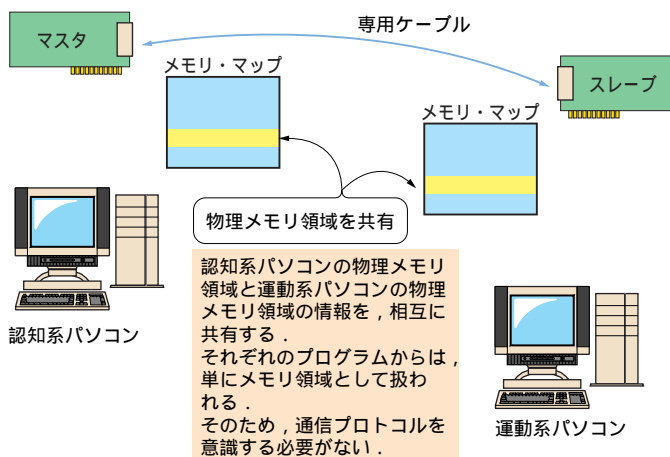



図2　RI-MANの電気制御系の構成
認知系パソコン，運動系パソコン，小型汎用分散型コントローラなどで構成する．

のを用いています．OSにはリアルタイム性が要求されることから，RT-Linuxを用いて，制御周期のジッタを少なくしています．

認知系パソコンと運動系パソコンは，インタフェース社のメモリンクを用いて相互にデータを送受信しています．両パソコンとも一般的なパソコンと変わらないので，

図3
認知系パソコンと運動系パソコンは，インタフェース社のメモリンクを用いて相互にデータを送受信する
片側のパソコンで書き込まれた情報は，メモリンク・ボードを介してもう片側のパソコンに書き込まれる．

Ethernetを用いて相互に接続することも可能ですが，TCP/IPではリアルタイム性を確保することが難しく，また，UDPではエラー処理を行わないため，データの信頼性が下がってしまいます．

これに対してメモリンクは，メモリのある領域を相互で共有するシステムです(図3)．片側のパソコンで書き込んだ情報は，メモリンク・ボードを介してもう片側のパソコンに書き込まれます．お互いに同じ情報を共有するので，メモリのアクセスだけで他のパソコンの情報を知ることができます．RI-MANでは，認知系パソコンが行動を決定し，その行動コードをメモリンクを経由して運動系パソコンに送信します．

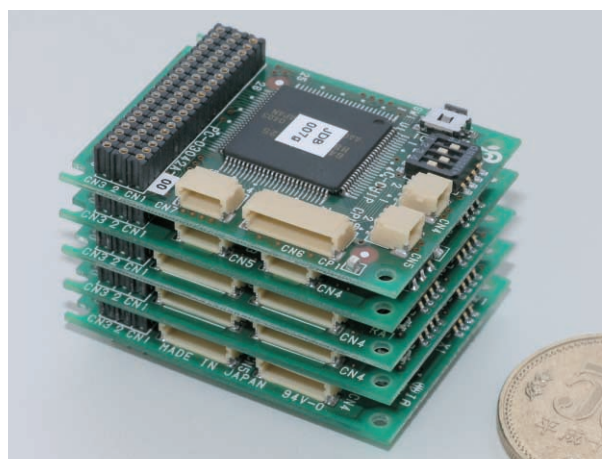
● 運動系パソコンと小型汎用分散型コントローラの連携

運動系パソコンと下位コントローラであるC-CHIP(下掲のコラム「小型汎用分散型コントローラC-CHIPの機能詳

コラム　小型汎用分散型コントローラC-CHIPの機能詳細

C-CHIPは，基板ごとに機能が違います．C-CHIPのラインナップには，表Aに示すようにCPUモジュールとしてルネサステクノロジのH8とSH-2を搭載した品種があります．機能モジュールにはA-Dコンバータ，D-Aコンバータ，カウンタ，I/O端子，シリアル通信，共有メモリがあります．これらの機能モジュールを写真Aに示すように連結して使用します．

表A　汎用分散型コントローラの各モジュールの概要

モジュール名	機　能
CPUモジュール　H8	周波数25MHz， ROM128Kバイト，RAM128Kバイト
CPUモジュール　SH-2	周波数50MHz， ROM128Kバイト，RAM128Kバイト
FPGAモジュール	40万ゲート
共有メモリ・モジュール	512バイト
A-Dモジュール	12ビット，8チャネル
D-Aモジュール	12ビット，8チャネル
I/Oモジュール	ディジタル16ビット入出力
カウンタ・モジュール	A，B，Z相　差動入力 2チャネル
シリアル通信モジュール	4チャネル，FIFO内蔵

写真A　小型汎用分散型コントローラC-CHIPの各モジュールを重ねたようす

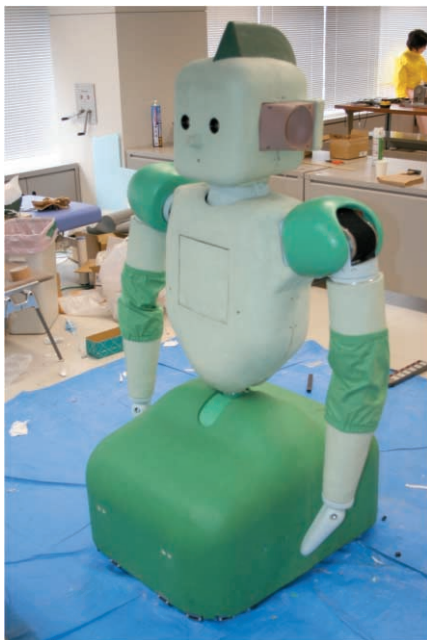
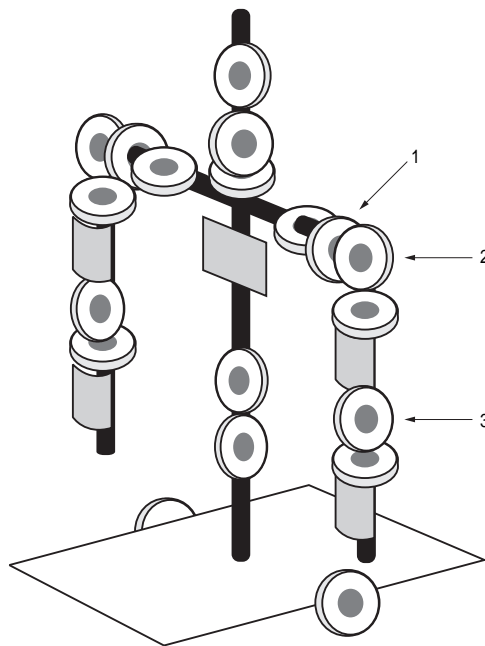



図4　RI-MANの関節
両腕にはそれぞれ6個のモータで動く三つの関節がある．

細」を参照）との間は，CUnet（ステップテクニカ）を用いて接続しています．CUnetは，コントローラに搭載された共有メモリによってデータを送受信するシステムです(2)．運動系パソコンのPCIバスにステップテクニカ製のCUnet用インターフェース・カードを設置しています．製品に添付されているドライバはWindows版だけなので，RT-Linux用ドライバを開発しました．

運動系パソコンとC-CHIPとの接続に使っている配線は，AWG32のツイスト・ペア・ケーブルです．そのため，非常に細く，ロボットの体内を通してもかさばりません．これによって，機構としてのロボットのボディ・サイズを小型化できました．

● 多数のセンサが搭載されている

RI-MANのセンサ系には，抱き上げ動作に必要な面状触覚センサや画像認識，音源定位，音声認識，においセンサ，障害物センサ，距離センサが装備されています．

面状触覚センサは，1枚に8行8列の計測ポイントがあり，押されている重心位置や大きさを知ることができます（面状触覚センサの詳細については，第3章を参照）．この触覚センサ1枚につき，1個のC-CHIPを取り付けて，センサ情報の変換（アナログ信号をディジタル信号に）と重心位置の計算，計測データの送信，しきい値の変更をしています．

画像認識は，頭部に取り付けたCCDカメラからの映像をキャプチャ・カードに入力し，パソコン内で人の顔を認識するようにしています．画像内から肌の色に近い部分を認識し，顔の形に近い部分を検出しています．検出した位置を画像の中心に持ってくるように，首の関節を動かします．

2．RI-MANの関節の駆動

RI-MANの両腕にはそれぞれ6個のモータで動く三つの関節があります（**図4**）．6個のモータは2個1組で動作することで，曲げとねじりの関節を駆動します．この干渉駆動機構と呼ばれる機構を採用したRI-MANは，抱え上げ作業で大きな力が必要な肩の振り上げやひじの曲げ伸ばしを，モータ2個分のトルクで実現しています．これにより，小型で高い出力を持つ腕を備えています．

● 一つの関節を2個のモータで駆動する干渉駆動を採用

肩関節とひじ関節の駆動には，干渉駆動という機構を用いています．ロボットの関節というと，一つの関節を一つの電気モータで駆動するのが一般的です．しかし，人を抱き上げる動作を考えると，腕の関節には大きな力が必要であり，それを一つの電気モータで実現するのは，人と同じ大きさの腕では困難です．

そこで，一つの関節を2個の電気モータで駆動する干渉駆動を採用しました．この干渉駆動は，**写真1(a)**に示すように，2個のモータの軸にそれぞれハイポイド・ギアが取り付けられており，関節の出力軸にマイタ・ギアが取り付けられています．

この干渉駆動を用いた関節は，2自由度を持ちます．軸周りの回転と軸を屈曲する方向の2種類です．しかし，モータの回転速度を等しくし，回転方向をそれぞれ逆方向にすると，出力軸は軸周りには回転せず，屈曲だけの動作を行います．このときの出力軸の力は，屈曲動作をモータ2個で行っているので，1個のモータで実現した関節の2倍の力を出すことができます．干渉駆動は力が必要でないときは2自由度の関節として使用できるので，巧みな動作を実現できます[(**写真1(b)**)]．

● 干渉駆動のしくみ…最大出力トルクは2倍

干渉駆動には2個のモータを使用するため，2個のモータ・ドライバが必要になります．使っている電気モータはDCモータなので，DCモータ用のドライバを用いて関節を制御しています．関節の回転速度，出力トルクは2個のモータの回転速度とトルクによって決まります．

1関節に一つのモータを搭載する仕様であれば，関節の出力トルクは「モータの出力トルク×ギア比」で，速度は「モータの回転速度÷ギア比」によって計算できます．しかし干渉駆動では，1軸に力を集中すると他の軸に力が出せないといった軸相互の干渉を受けます．その関係は**図5**のようになっており，出力軸の一方のトルクを大きくすると他の出力軸のトルクは小さくなります．しかし，最大出力

(a) 外観

(b) 生じるトルク

写真1 干渉駆動を行うモータとギア

(a) 二つのモータが同じ方向に同じ速度で回転．ねじりの軸のみが回転1

(b) 二つのモータが同じ方向に同じ速度で回転．ねじりの軸のみが回転2

(c) 二つのモータがそれぞれ逆方向に回転．屈曲関節のみが回転1

(d) 二つのモータがそれぞれ逆方向に回転．屈曲関節のみが回転2

(e) 片方のモータのみが回転．ねじりと屈曲を同時に実現できる1

(f) 片方のモータのみが回転．ねじりと屈曲を同時に実現できる2

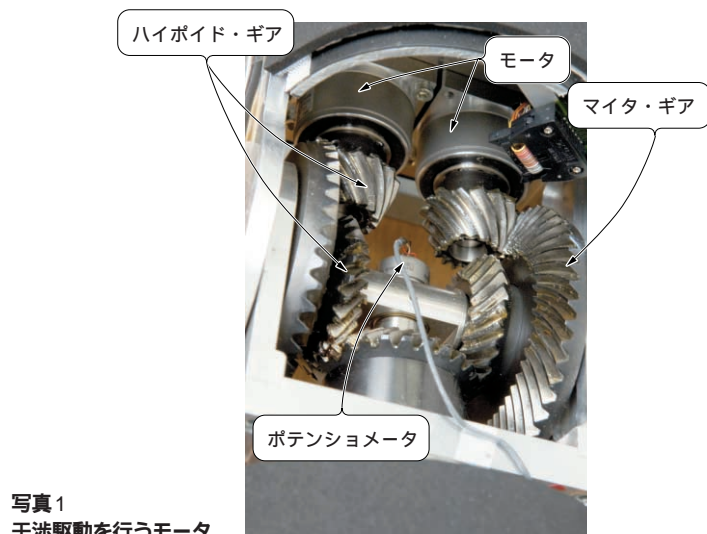
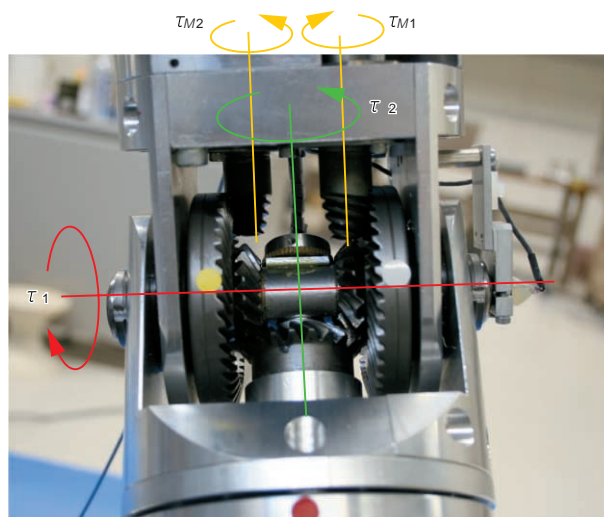
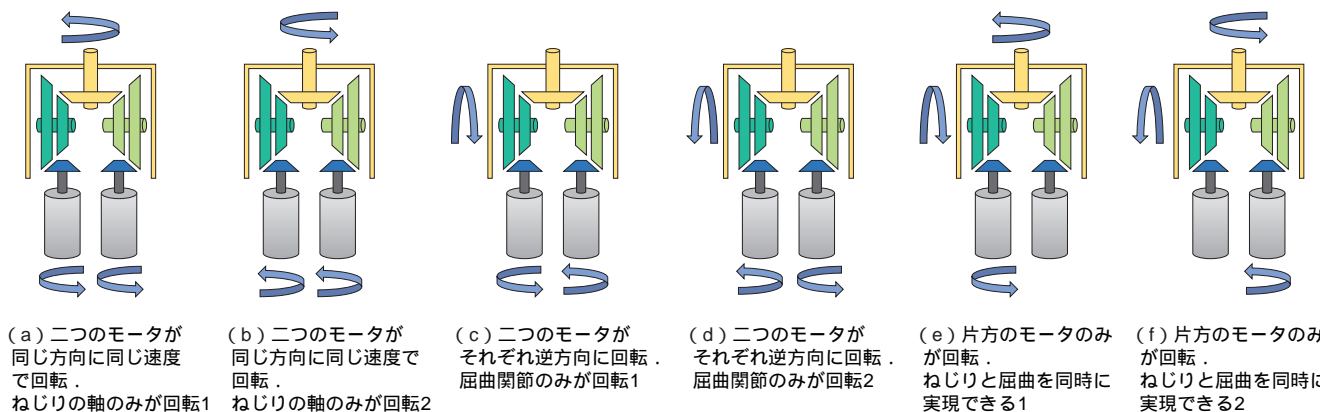



図5 モータの動きと腕(ひじ，肩)の動きの関係

トルクは2倍(モータ2個分)になります．

このように，2個のモータの相互作用によって出力軸の速度とトルクが決まるので，二つのモータを同時に制御する必要があります．そこで，干渉駆動の制御回路には，図6に示すように，2個のモータへの指令値を1個のC-CHIPを用いて行っています．

干渉駆動の関節には，回転角度とねじり角度の検出用にそれぞれポテンショメータが取り付けてあります．C-CHIP内では，このポテンショメータの値をA-D変換回路から取得し，現在の関節の角度を得ています．得られた角度と目標角度の差から二つのモータへの指令値を制御します．

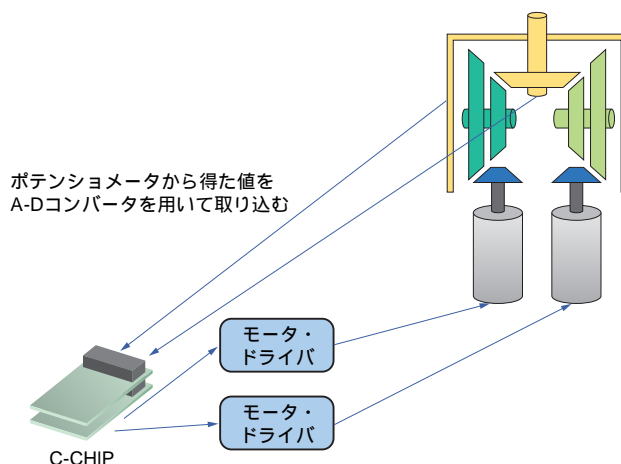



図6　腕の制御
2個のモータへの指令を1個のC-CHIPで行う．

3．RI-MANを制御するソフトウェア

● 人間の大脳に相当する認知系

認知系は人間の大脳に相当する部分で，RI-MANではパソコンを用いています．画像認識，音源定位，音声認識，音声合成の処理を，すべてソフトウェアで行っています．

画像認識は，頭部に取り付けた2台のCCDカメラからの映像をキャプチャ・カードによって取り込んでいます．取り込んだ画像は，色抽出と領域抽出によって人の顔の色と形に近い位置を探しています．

音源定位には，8チャネル音声入力ボード「TD-BD-8CSUSB」(東京エレクトロンデバイス)を使って，両耳からの音声情報を同時にサンプリングし，USBを経由してパソコンに取り込んでいます．

音声認識には，音声認識・合成ユニット(東芝ITコントロールシステム)を用いています．このユニットは，任意に設定した言葉を認識させることができ，RS-232-Cインターフェースによって識別した結果を認知系パソコンへ送信しています．認知系パソコンには，頭部に取り付けた2台のCCDカメラからの画像をキャプチャするキャプチャ・カードと，運動系パソコンと接続するためのメモリンク・ボードが組み込んであります．

● 人間の小脳に相当する運動系

運動系は人間の小脳に相当する部分です．RI-MANではRT-Linuxをインストールしたパソコンを用いています．この部分は，リアルタイムに各関節の角度を計算します．認知系によって動作が決定され，運動系パソコンにその情報がメモリンクを介して伝送されます．

運動系パソコンは，この動作情報を基にすべての関節角度を計算し，制御周期以内に下位コントローラ(モータ駆動用C-CHIPやセンサ処理用C-CHIP)にCUnetを用いて伝送します．

● 関節やセンサなどの近くに設置する下位コントローラ

下位コントローラには小型汎用分散型コントローラC-CHIPを用いています．RI-MANでは，このC-CHIPを関節の制御や車輪の制御，センサ情報の処理に使っており，体中で合計19個使っています．

C-CHIPは小型であることを生かして，関節やセンサの近くに配置しています．そのため，モータ制御用の電力線やセンサ出力信号のアナログ信号線を，ロボットの体中に引き回すことなく，モータやセンサの近くで処理しているので，信号の電圧降下やノイズの飛び込みを極力抑えています．

運動系パソコンには，CUnet用のPCIインターフェースボードを内蔵しています．RI-Linuxからは，専用のドライバを作成してデータを下位コントローラに送信しています．送信されたデータはC-CHIP内で処理され，モータ・ドライバへの指令信号をD-Aコンバータで生成します．

センサからの情報はC-CHIP内で前処理され，CUnet上ですべてのコントローラに公開されます．すべてのデータが2ms以内にすべてのコントローラに公開されるので，運動系パソコンはCUnetの共有メモリを読み出すことによって，生物におけるせき髄反射のように，即座にセンサの情報を知ることができます．

コラム RI-MANの作業例

RI-MANの動作と内部データの流れを具体的な作業動作例で紹介します．

● 作業例1…抱き上げ動作

RI-MANから離れたところに置かれたベッドの上にダミー人形(名前は，さくらさん)が座っており，RI-MANがその人形を抱き上げてもとの位置に戻ってくるというものです．

はじめに操作者が，①「あの人を抱き上げてくださいRI-MAN」と言います．このとき，音声認識によって，「あの人」と「RI-MAN」を認識します．この認識結果が認知系パソコンに送られると，認知系パソコンが抱き上げの準備に入り，操作者に確認を取ります．認知系パソコンから，音声合成工程に，②「あそこに座っている人ですか？」と発声させ，作業の確認を行います．この音声合成工程と同時に，③運動系パソコンに対して座っている人を指さすように指令を出します．

④運動系パソコンは，認知系パソコンからの指令を基に，人を指し示すために必要な関節角度をリアルタイムに計算し，CUnetを介して下位コントローラに指令を出します．下位コントローラは，関節に取り付けたポテンショメータの関節角度を指令された関節角度と比較して，その差が0になるようにモータ・ドライバに指令を出します．

そして，操作者が⑤「はいそうです」と言うと，⑥車輪を動かしてベッドの上の人に向かって動き出します．⑤'「いいえ違います」と言うと，⑥'「でわ(は) やめます」と言って，抱き上げ準備をキャンセルし，動作待ち状態に遷移します．

操作者が「はいそうです」と言うと，⑥RI-MANがベッドに向かって動き出し，手前で車輪を止めます．ここから抱き上げ状態に入って行きます．⑦ベッドの上の人形を認識して，両手を差し出します．⑧左手で人形の足をすくい上げ，右手で頭の少し下を支えます．

このとき，両腕の面上触覚センサからの情報を基に，腕の中での人形の位置を計測し，安定に抱き上げているようであれば，そのまま元の位置に移動します．人形の重心がどちらかの腕に偏っているようであれば，その偏りを修正するように腕を動かします．このようにして安定に抱き上げます．実際には，さらに多くの動作モードが存在しますが，基本的なデータの流れは，上記の動作例と同じです．

⑨腰の関節と腕を使って，人形を抱き上げます．そして，来た道を戻って，初期位置に戻ります．⑩戻ったところで人形をRI-MANの腕から下ろすと，腕にかかる力が減ったことを感知して，抱き上げ動作全体のシーケンスが終了したことを知り，「抱き上げ終了しました」と言い，一連の動作を終了します．

● 作業例2…柔らかい制御

RI-MANに「触覚を見せてください」と言うと，両手を前に出して腕の触覚センサを出します．そして，触覚センサの部分を触ると，押された力を0にするように，腕を動かします．しかし，触覚センサが取り付けられていないところを触ると，腕は動きません．

RI-MANは，大変大きな力を出すことができます．それと同時に，触覚センサを用いて柔らかい制御も可能にしています．

＊　　＊

RI-MANは，2006年3月に記者発表してから，社会から大きな関心が寄せられました．今後はさらなる安全性の追及や機能の向上，使いやすさの向上を目指して，研究や開発が進むことを期待しています．

参考・引用*文献

(1) 8チャンネル音声入力ボード「TD-BD-8CSUSB」，東京エレクトロンデバイス．
http://www.inrevium.jp/pm/image_audio/8csusb.html
(2) 平野慎也，羅志偉，加藤厚生；分散処理を取り入れた自律型ロボット「いもむし」の開発，Design Wave Magazine，2006年4月号，pp.104-114.
(3) NI LabWindows/CVI，日本ナショナルインスツルメンツ．
http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ja/nid/11104
(4) CUnet，ステップテクニカ．
http://www.steptechnica.com/products/cunet.html
(5) メモリンクとは？，インタフェース．
http://www.interface.co.jp/catalog/selection/memolink/memolink.asp
(6) 音声認識・合成ユニット，東芝ITコントロールシステム．
http://www.toshiba-itc.com/sec/sec3.html

ひらの・しんや
独立行政法人理化学研究所 バイオ・ミメティックコントロール研究センター環境適応ロボットシステム研究チーム，リサーチ・アソシエイト

<筆者プロフィール>
平野慎也．刈谷工業高校時代に恩師から電子回路の知識・技術を教わる．2006年3月，愛知工業大学大学院博士課程満期退学，同年4月から現職場にて働き始める．遅寝早起きを実践中．